

**Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik
Hannover**

**Fachinformationssystem Geophysik:
Temperaturkorrekturverfahren**

Sachbearbeiter:

Iakov Bolotovskiy, Dipl.-Phys.
Rüdiger Schellschmidt, Dipl.-Geophys.
Dr. Rüdiger Schulz, Dir. und Prof.

Berichtsdatum:

23.02.2015

Archiv-Nr.:

013 25 27

Datengrundlage

Beim LIAG wird das Fachinformationssystem (FIS) Geophysik (www.fis-geophysik.de, KÜHNE et al. 2003)) und das Geothermische Informationssystem (GeotIS) für Deutschland (www.geotis.de, AGEMAR et al. 2014) betrieben, das Daten aus dem FIS Geophysik nutzt. Das FIS Geophysik enthält Messdaten und Auswertungen verschiedener geophysikalischer Verfahren, vorrangig für das Gebiet von Deutschland. Es sind Daten des LIAG, aber auch von Partnerinstitutionen gespeichert. Das FIS Geophysik unterstützt über eine Internet-Schnittstelle auch die Informationsansprüche der wissenschaftlichen Öffentlichkeit. Dabei bleiben die rechtlichen Randbedingungen gewahrt. Die Datenbank des FIS Geophysik besteht aus einem Überbau und verschiedenen Subsystemen. Jedes Subsystem nimmt die spezifischen Daten eines geophysikalischen Verfahrens (z. B. Geothermik) auf.

Das Subsystem Geothermik enthält ca. 11.200 Bohrungen mit Temperaturdaten aus dem Untergrund. Ungestörte Temperaturlogs und Lagerstättentemperaturen werden als optimale Daten angesehen. Lagerstättentemperaturen liegen aufgrund der regelmäßigen, langjährigen Kontrolle der Förderbohrungen als umfangreiche Messwertreihen vor; die Schwankungsbreite dieser Temperaturwerte liegt überwiegend unter 1 K.

BHT-Korrekturen

Zur Erstellung von Temperaturkarten in beliebigen Maßstäben und für beliebige Tiefen werden neben Temperaturlogs, Lagerstättentemperaturen und Fördertests vor allem *Bottom Hole Temperatures* (BHT) verwendet. Diese BHT-Messungen werden in fast allen Industriebohrungen im Bohrlochtiefsten, unmittelbar nach Einstellen der Bohrarbeiten, ausgeführt und sind durch den Bohrvorgang (Spülungsumlauf) thermisch gestört. Eine Korrektur (Extrapolation) dieser BHT-Werte auf ungestörte Temperaturen ist möglich, da im Bohrlochtiefsten der störende Einfluss des Spülungsumlaufs auf das Temperaturfeld am geringsten ist. In Abhängigkeit von der Stillstandzeit nach Bohrende, der Spüldauer (Spülungsumlauf) und der Anzahl der für jede Tiefe zur Verfügung stehenden Temperaturwerte können unterschiedliche Extrapolationsverfahren angewendet werden (AGEMAR et al. 2012, SCHULZ & SCHELLSCHMIDT 1991, SCHULZ et al. 1990, SCHULZ et al. 1992, SCHULZ & WERNER 1987).

1. Explosionszylinderquellenansatz (LEBLANC et al. 1982, MIDDLETON 1982):

Wenn drei oder mehr BHT-Werte in einer Tiefe zu unterschiedlichen Zeiten nach Zirkulationsstopp vorliegen, kann die Explosionszylinderquellenkorrektur eingesetzt werden. Bei diesem Ansatz wird die Temperatur der Spülungsflüssigkeit nach Einstellen der Zirkulation ($t = 0$) als konstant angenommen und weicht um den Betrag ΔT von der ungestörten Gebirgstemperatur ab.

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t) - \Delta T (e^{-a^2/4kt} - 1) \quad (1)$$

mit	T_{∞}	=	ungestörte Gebirgstemperatur	[°C]
	BHT	=	gemessene Bottom Hole Temperatur	[°C]
	ΔT	=	anfängliche Temperaturstörung	[K]
	a	=	Bohrlochradius	[m]
	κ	=	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]

t = Zeit nach Zirkulationsstop [s].

T_{∞} wird berechnet durch eine Anpassungsmethode, bei der ΔT und κ variiert wird, wobei κ die effektive Temperaturleitfähigkeit der Spülungsflüssigkeit und des umgebenden Gesteins ist (SCHULZ et al. 1992).

2. Annahme einer kontinuierlichen Linienquelle (HORNER 1951):

Stehen nur zwei BHT-Werte zur Verfügung, wird ein Linienquellenansatz verwendet, hergeleitet aus dem negativen Wärmetransport während der Zirkulationszeit der Spülungsflüssigkeit (Horner-Korrektur).

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t) - \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t+s}{t}\right) \quad (2)$$

mit q = Wärmeflussrate pro Längeneinheit [W/m]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

s = Zirkulationszeit [s].

3. Explosionslinienquelle (LACHENBRUCH & BREWER 1959):

Wenn die Zirkulationszeit vernachlässigt werden kann, wird eine Linienquellen-Näherung mit einer „Explosions“-Wärmesenke angewendet.

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t) - \frac{Q}{4\pi\lambda} \frac{1}{t} \quad (3)$$

mit Q = Wärme pro Längeneinheit [J/m].

4. Zylinderquellenansatz mit statistischen Parametern (MIDDLETON 1982):

Bei der Extrapolation von zeitlich nur einfach belegten BHT-Werten auf die ungestörte Temperatur wird wieder das Zylinderquellenmodell (1) verwendet. Die unbekannt Parameter – die Temperaturstörung und die effektive Temperaturleitfähigkeit (SCHULZ et al. 1992) – müssen aus umgebenden Messungen mit höherem Informationsgehalt statistisch ermittelt werden.

Trotz der angewendeten Korrekturen sind diese Ergebnisse im Gegensatz zu ungestörten Temperaturlogs noch mit einem Fehler von ca. ± 5 K behaftet.

Vorgehensweise bei den BHT-Korrekturen

Bei der numerischen Realisation der o.g. Korrekturmethode ergeben sich folgende wesentliche Schwierigkeiten:

- Es gibt unbekannte Parameter in den Gleichungen (1) - (3).
- Ergebnisse, die mit verschiedenen Verfahren erzielt werden, stimmen manchmal sehr schlecht überein.
- Die BHT-Messwerte streuen teilweise stark und sind von schlechter Qualität.

Deshalb müssen sehr oft zusätzlich statistische Betrachtungen und empirische Erfahrungen genutzt werden.

Die BHT-Korrekturen werden nach ihrer Qualität und Messanzahl nach verschiedenen Ansätzen in mehreren Schritten durchgeführt.

1. Stehen drei oder mehr BHT-Werte in einer Tiefe zu unterschiedlichen Zeiten nach dem Zirkulationsstopp zur Verfügung, wird die Explosionszylinderquellen-Korrektur (1) unter Verwendung aller BHT-Werte durchgeführt. Um fehlende Parameter zu kompensieren, wird eine statistische Regressionsanalyse angewendet. In diesem Fall sucht man eine lineare Beziehung zwischen gemessenen BHT(t)-Werten und der Funktion $f_1(t) = \exp(-a^2/4kt) - 1$.

Da $f_1(t) \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$ gilt, ergibt der Schnittpunkt der Regressionsgerade mit der y-Achse den Wert für T_∞ . Zu der Regressionsgeraden bekommt man für den Datensatz den Korrelationskoeffizient und die Standardabweichung. Hierbei wird die Standardabweichung durch Variation des Bohrlochradius a minimiert. Bei einem bekannten Bohrungsdurchmesser startet die Optimierung bei $0,5 \cdot a$, ansonsten bei 0 .

Gleichzeitig bestimmt man die Regressionsgerade für das Horner-Verfahren (2) mit $f_2(t) = \ln((t+s)/t)$. Für die Spülungszeit s wird aufgrund von Erfahrungen ein fester Wert von 8 Std angenommen. Numerische Tests zeigen, dass die Veränderung dieses Werts keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Liegt die Zylinder-Korrektur T_∞ zwischen 0 und 300 °C ($0 \text{ °C} < T_\infty < 300 \text{ °C}$), ist der Korrelationskoeffizient $> 0,99$ und ist gleichzeitig die Abweichung zur Horner-Korrektur $< 5 \%$, so wird das Ergebnis der Explosionszylinderquellen-Korrektur verwendet.

Anderenfalls wird mit der Horner-Korrektur mit Eliminierung fortgefahren. Ist bei der Horner-Korrektur der Korrelationskoeffizient $> 0,99$, dann wird dieses Ergebnis als T_∞ akzeptiert. Ansonsten wird der zeitlich erste BHT-Wert eliminiert und das Horner-Verfahren erneut angewendet, bis der Korrelationskoeffizient $> 0,99$ wird, was bei nur zwei BHT-Werten automatisch erfüllt wird.

In komplizierten Fällen hat der Bearbeiter die Möglichkeit, manuell beliebige BHT-Messungen zu aktivieren oder deaktivieren und zwischen den Ergebnissen von drei Korrekturverfahren auszuwählen.

2. Stehen nur zwei BHT-Werte zur Verfügung, werden eine Horner- sowie eine Explosionslinienquellen-Korrektur (3) durchgeführt. Durch die zwei Punkte der Form $(\ln((t+s)/t), BHT)$ bzw. $(1/t, BHT)$ wird eine Gerade gezeichnet (im Programm mit Hilfe einer Regressionsprozedur) und der Durchgang durch die y-Achse liefert jeweils die gesuchte Temperatur. Der Maximalwert aus den beiden Verfahren (Horner und Linienquelle) wird als T_∞ verwendet.
3. Stehen zeitlich nur einfach belegte BHT-Werte zur Verfügung so wird eine geschätzte Korrektur mit oder ohne Zeitangabe (SCHULZ & WERNER, 1987: S.14) durchgeführt. Als Grundlage für diese Berechnung dient wieder Gleichung (1), für die fehlenden Parameter müssen zusätzliche Annahmen getroffen werden. Die anfängliche Temperaturstörung wird abgeschätzt durch:

$$\Delta T = T_\infty - T_m = T_\infty - \frac{(T_\infty + T_0)}{2} \quad (4)$$

mit T_0 = mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche [°C]

T_m = Spülungstemperatur am Ende des Bohrens [°C].

Aus (1) und (4) erhält man für die ungestörte Temperatur:

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t) + \frac{1 - e^{-a^2/4kt}}{1 + e^{-a^2/4kt}} (\text{BHT}(t) - T_0) \quad (5).$$

Für die Korrekturberechnungen werden feste Parameter verwendet, die aufgrund von Erfahrungen, numerischen Tests und statistische Daten festgelegt wurden:

- Durchmesser: $a = 6,25$ [Zoll]
- Temperaturleitfähigkeit: $\kappa = 0,15 \cdot 10^{-6}$ [m²/s].

Damit kann die ungestörte Temperatur für einen BHT-Wert mit gemessener Standzeit berechnet werden.

Ist aber auch die Standzeit unbekannt, kann man versuchen, sie statistisch abzuschätzen. Als Grundlage für eine statistische Berechnung der Standzeit wird die gesamte Datenmenge, also alle BHT-Werte verwendet. Man erhält damit (Anlage 1) die Standzeit als Funktion der Messteufe z :

$$t = 3,612 \text{ [Std]} + 0,001639 \text{ [Std/m]} * z \text{ [m]} \quad (6).$$

Literatur

- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2012): Subsurface Temperature Distribution of Germany. – *Geothermics* **44**: 65– 77.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K., SCHUMACHER, S. & SCHULZ, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany – GeotIS. – *Z. Dt. Ges. Geowiss.*, **165(2)**: 129-144.
- HORNER (1951): Pressure build-up in wells. - Proc. Third World Petroleum Congress, **34**: 316; The Hague.
- KÜHNE, K., MAUL, A.-A. & GORLING, L. (2003): Aufbau eines Fachinformationssystems Geophysik. – *Z. Angew. Geol.* **2/2003**: 48-53; Hannover.
- LACHENBRUCH, A.H. & BREWER, M.C. (1959): Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska. - *Geological Survey Bulletin*, **1083-C**: 73-109; Washington.
- LEBLANC, Y., LAM, H.-L., PASCOE, L.J. & JOHNES, F.W. (1982): A comparison of two methods of estimating static formation temperature from well logs. - *Geophys. Prosp.*, **30**: 348-357.
- MIDDLETON, M.F. (1982): Bottom-hole temperature stabilization with continued circulation of drilling mud. - *Geophysics*, **47**: 1716-1723.
- SCHULZ, R., HAENEL, R. & KOCKEL, F. (1992): Federal Republic of Germany - West federal states. - In: HURTIG, E., CERMAK, V., HAENEL, R. & ZUI, V. (EDS.): *Geothermal Atlas of Europe*: 34-37; Gotha.
- SCHULZ, R., HÄNEL, R. & WERNER, K.H. (1990): Geothermische Ressourcen und Reserven: Weiterführung und Verbesserung der Temperaturdatensammlung. - Report **EUR 11998 DE**: 75 pp; Luxembourg (Office for Official Publications of the European Communities).
- SCHULZ, R. & SCHELLSCHMIDT, R. (1991): Das Temperaturfeld im südlichen Oberrheingraben. – *Geol. Jb.*, **E48**: 153-165; Hannover.
- SCHULZ, R. & WERNER, K.H. (1987): Einfache Korrekturverfahren für Temperaturmessungen. – *NLFB-GGA-Bericht, Archiv-Nr.* **99 914**; Hannover.

Anlage 1: Statistische Ermittlung der Standzeit

1. Die geothermische Datenbank im FIS Geophysik enthält Bohrungen mit ca. 7.000 Teufen mit bekannter Standzeit (STZ) und ca. 6.000 ohne. Für Teufen mit bekannter erster STZ haben wir eine Verteilung über verschiedene Teufenintervalle (50, 100, 150 m usw.) durchgeführt.
2. Für jedes Intervall wurde eine durchschnittliche STZ berechnet unter folgenden Bedingungen :
 - Erste STZ ist kleiner als eine bestimmte Grenze (19-24 Std).
 - Anzahl der Teufen, die zu einem Intervall gehören, ist größer als 6-12; diese Mindestzahl ist für eine zuverlässige Statistik notwendig und nimmt für tiefere Intervalle aufgrund der Datenlage ab.
3. Mit Hilfe der Regressionsanalyse bekommt man Beziehungen zwischen zwei Datensets (mittlere Intervallteufe und mittlere STZ), nämlich: eine Regressionsgerade und dazu Korrelationskoeffizient und Standardabweichung.
4. Für bestimmte Intervallgrößen (von 50 bis 250 m) berechnen wir mit variierenden Bedingungen aus Punkt 2 Mittelwerte für Regressionsergebnisse und wählen diejenige mit maximaler Korrelation und minimaler Abweichung.
5. Das beste Ergebnis erhalten wir für die Intervallgröße 200 m, u. z. die Regressionsgerade mit folgenden Parametern (Abb. 1):
 - YABS (Achsenabschnitt) = 3,612 [Std];
 - STEIG (Steigung) = 0,001639 [Std/m].Diese Werte werden für die Berechnung der unbekanntenen Standzeit bei bekannter Messteufe verwendet (s. Gleichung 6).

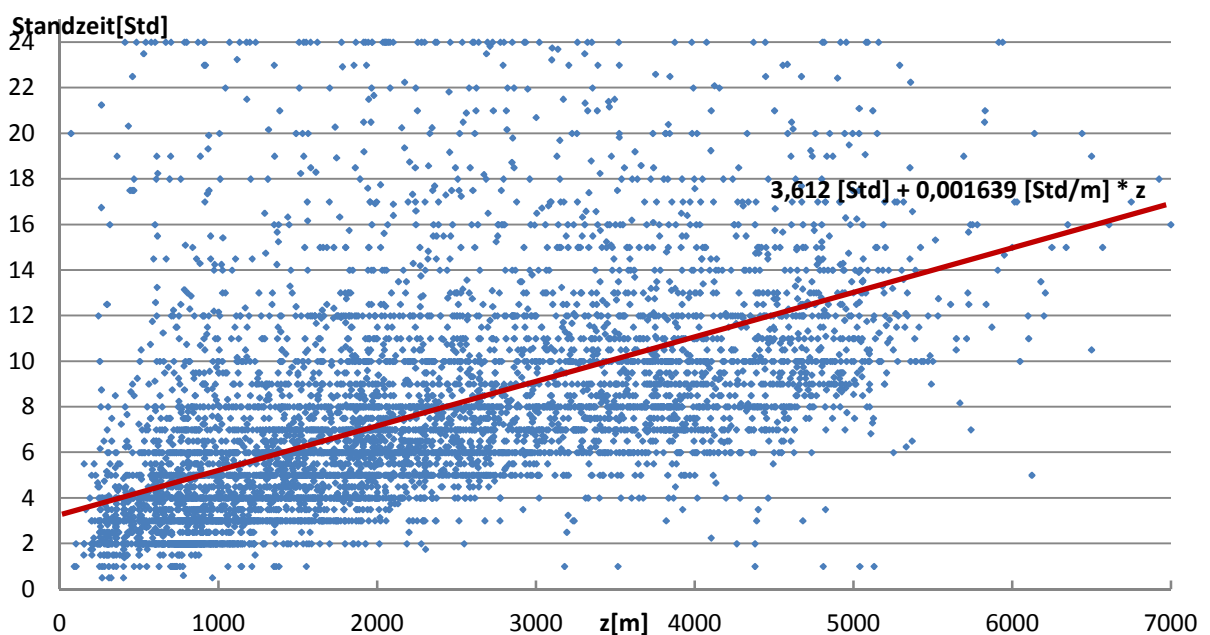


Abb. 1: Streuung der Standzeit bei BHT- Messungen und Regressionsgerade